

QIANYINGONGDIANXITONG XIEBO HE BUPINGHENGDU
ZAIDIANLIXITONG DE FENBUJISUAN

牵引供电系统谐波和不平衡度 在电力系统的分布计算

吴俊勇 付红军 胡扬宇 编著

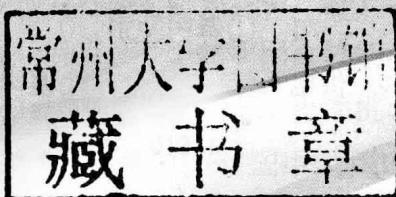


中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

QIANYINGONGDIANXITONG XIEBO HE BUPINGHENGDU
ZAIDIANLIXITONG DE FENBUJISUAN

牵引供电系统谐波和不平衡度 在电力系统的分布计算

吴俊勇 付红军 胡扬宇 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是依据河南省电力调度通信中心和北京交通大学合作开展的“高速电气化铁路对河南省电网稳定特性影响”这一课题的研究成果编写而成的。全书分为7章, 主要内容包括电力系统、牵引供电系统三相基波与谐波模型, 三相潮流计算, 电力系统谐波与不平衡度分布计算软件 PSHP, 牵引变电站现场实测结果与统计分析, 谐波与不平衡度的计算实例与分析。

本书可作为高等院校电气工程、铁路电气化等相关专业的参考书, 也可供电力继电保护、电能质量、铁路供电等相关专业的技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

牵引供电系统谐波和不平衡度在电力系统的分布计算/
吴俊勇, 付红军, 胡扬宇编著. —北京: 中国电力出版社,
2012.7

ISBN 978-7-5123-3334-5

I. ①牵… II. ①吴…②付…③胡… III. ①牵引
供电系统-电压分布计算 IV. ①TM922.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 169905 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 9 月第一版 2012 年 9 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 8.25 印张 112 千字

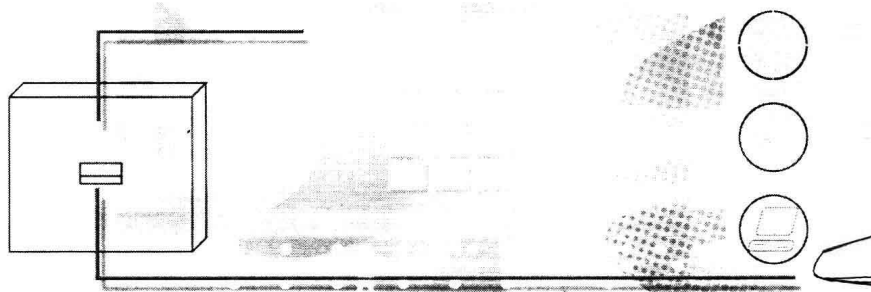
印数 0001—2000 册 定价 20.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言



根据国务院批准的《中长期铁路网规划》，到 2020 年，我国铁路总里程将达到 100 000km，其中电气化 50 000km，主要干线铁路将实现电气化。其中，将建成以京沪、京广、京哈、沪涌深及徐兰、杭长、青太及沪汉蓉“四纵四横”客运专线（高速铁路）12 000km，客货混跑快速线路 20 000km，形成我国铁路快速客运网。随着列车运行速度不断提高，牵引功率成倍增长，高速电气化铁路的谐波和负序对电网的威胁也越来越大。以河南省为例，以京广线为代表的 250km/h 既有干线铁路和 2009 年底建成投运的 350km/h 郑西高速客运专线交织成网，对河南省的经济腾飞起到重要支撑作用的同时，也正在对河南省电网的安全、可靠运行构成威胁。研究表明，由于电气化铁路特有的单相负荷、随机性和冲击性强等特点，不但功率因数较低，而且由电力机车所产生的谐波和负序分量会对电力系统的发电机、电动机、变压器和继电保护装置造成不利影响，严重时可能引起发电机误跳闸。国内外都发生过由于电力机车的谐波和负序分量造成电力系统故障的实例。

2009 年底，河南省电力调度通信中心和北京交通大学合作，开展了“高速电气化铁路对河南省电网稳定特性影响”课题研究。在近两年的时间里，项目组自主开发了电气化铁路牵引变电站电能质量测试系统，对郑西客运专线的洛阳南和巩义南两个牵引变电站的电能质量进行了现场测试；针对含牵引变电站的电力系统，提出用基波和谐波解耦的潮流计算方法来计算牵引供电系统谐波和不平衡度在电力系统中的分布，自主开发了 PSHP 电力系统谐波和不平衡度渗透计算软件，获国家软件著作权（BJ29200）；利用 PSHP 软件和现场测试的数据，对河南省的郑州、洛阳和三门峡三个地区电网进行了

分析计算，得到了电气化铁路谐波和不平衡度在电力系统中分布的一些规律；根据计算结果对电力系统继电保护的启动原理和定值进行了校验，降低了电力系统继电保护误动作的可能性，提高了电力系统的安全运行水平；项目还申报了国家发明专利 1 项（“一种用于电力系统暂态稳定分析的牵引变电站计算方法”，201010588824.7），制定了企业标准 1 项，发表 EI 检索论文 4 篇，取得了丰硕的研究成果。2011 年 2 月 18 日，河南省电力公司在河南组织了该项目的科技成果鉴定，鉴定委员会一致认为，“该项目结合河南电网实际，首次从现场测试、分布计算、暂稳建模和继电保护校验等方面，就高速电气化铁路对河南电网稳定特性的影响进行了研究。该项目整体上处于国际先进水平，其中在牵引变电站暂态稳定建模方面处于国际领先水平”。该项目成果还荣获了国家电网公司 2011 年度科技进步二等奖。

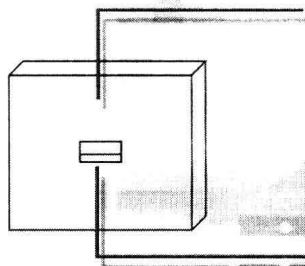
本书是依据该项目成果编写而成的，对牵引变电站暂态稳定建模和潮流计算等内容进行了阐述。全书共分 7 章，其中吴俊勇负责编写第 1、4、7 章，付红军负责编写第 2、3 章，胡扬宇负责编写第 5、6 章。在本书的写作过程中，北京交通大学的研究生张西鲁和冀鲁豫做了大量的工作，河南省电力公司、河南省电力调度通信中心和中国电力出版社都给予了大力的支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

限于作者的水平和条件，书中疏漏在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

2012 年 4 月

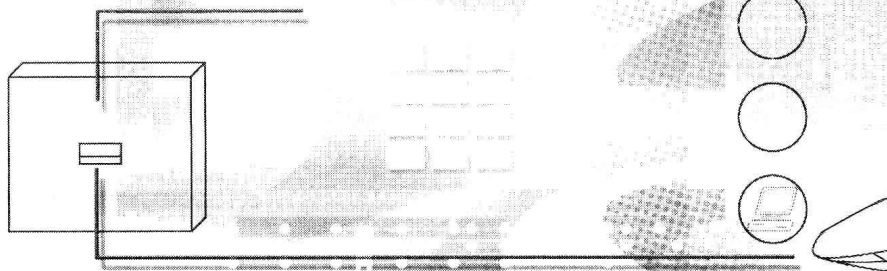
目 录



前言

第 1 章 概论	1
1.1 谐波和不平衡度的产生及其对电力系统的影响	1
1.2 电力系统谐波和不平衡度的分布计算的必要性和意义	4
第 2 章 电力系统三相基波与谐波模型	6
2.1 同步发电机的三相谐波模型	6
2.2 输电线路的三相基波与谐波模型	7
2.3 电力变压器的三相基波与谐波模型	11
2.4 电力负荷的三相谐波模型	14
第 3 章 牵引供电系统三相基波与谐波模型	15
3.1 端口变换关系与变换阵	15
3.2 牵引变压器的变换	19
3.3 牵引系统的三相系统变换	22
3.4 牵引变压器的各序阻抗	26
第 4 章 三相潮流计算	28
4.1 三相基波潮流计算	28

4.2 三相谐波潮流计算	33
第 5 章 电力系统谐波与不平衡度分布计算软件 PSHP	36
5.1 软件结构	36
5.2 输入数据文件结构	37
5.3 输出数据文件结构	39
第 6 章 牵引变电站现场实测结果与统计分析	42
6.1 牵引供电系统及测试说明	42
6.2 牵引变电站的实测结果与统计分析一	49
6.3 牵引变电站的实测结果与统计分析二	65
第 7 章 谐波与不平衡度的计算实例与分析	81
7.1 计算实例与分析一	81
7.2 计算实例与分析二	95
7.3 计算实例与分析三	106
7.4 牵引变压器的序阻抗	118
7.5 小结	119
参考文献	121



概 论

1.1 谐波和不平衡度的产生及其对电力系统的影响

在我国，铁路电气化牵引以其高速、重载、节约一次能源和环境污染轻等优点而被广泛应用在现代铁路运输中。铁路电力机车牵引负荷是波动性很大的大功率单相整流负荷，具有以下特点：① 不对称性，在供电系统中产生负序分量；② 非线性，在供电系统中产生高次谐波；③ 波动性，使供电系统电压波动；④ 功率大，分布广。随着电气化铁路特别是大功率高速铁路的大规模兴建和投运，电力机车所带来的谐波和不平衡对电力系统的影响也越来越大。研究电气化铁路的谐波和不平衡度及其在电力系统中的分布，对保证电力系统安全稳定运行，促进高铁和电力系统的和谐发展，都具有重要的应用价值和现实意义。

1.1.1 电力牵引负荷谐波的产生原因

自从采用交流电作为电能传输的主要方式以来，谐波就是人类在使用电能的同时必须面对的一个问题。对于电力系统谐波认识始于 20 世纪二三十年代，德国研究人员对静态整流器产生的波形畸变进行了探讨。正是从那时起，谐波问题引起了人们的关注。电网中的谐波主要是由各种大容量的用电变流设备以及其他非线性负荷产生的，其中主要的谐波源是电力电子装置，包括各种整流装置、交流调压装置、变流装置、电弧炉、办公及家用电器、照明设施等。电力机车中采用的大容量单相整流装置，除产生谐波电流外，还引起三相交流供电系统的三相电流不平衡。此外，一些铁磁非线性设备，

如发电机、变压器及铁磁谐振设备等，也是不可忽视的谐波源。所有这些都使得电力系统的电压、电流波形发生畸变，从而产生高次谐波。

电力牵引负荷谐波问题是电力系统谐波问题的一个分支，主要围绕电力牵引负荷这一特殊的谐波源而展开研究。

电力牵引负荷在电力系统中属于单相整流非线性不对称负荷。电力机车为单相谐波源，正常运行时电力机车的牵引电流发生明显的非正弦畸变，含有丰富的谐波成分，且由于谐波电流一般对横轴镜像对称，通常只含有奇次谐波分量。由于电气化铁路的不对称性，电力牵引负荷谐波为非对称谐波，各次谐波电流均通过牵引变压器输入电力系统。

1.1.2 谐波的危害

谐波对电力系统及用户会产生不良影响：

- (1) 介质击穿或无功过载而使电容器组故障；
- (2) 干扰纹波控制电力载波系统，引起遥控、遥测、负荷控制运行异常；
- (3) 引起感应电机和同步电机的额外损耗和过热；
- (4) 网络谐振引起过电压或过电流；
- (5) 谐波过电压引起绝缘电缆的介质击穿；
- (6) 对通信系统造成感应干扰；
- (7) 引起感应式电能表计量误差；
- (8) 引起信号干扰和保护误动，特别是固态型和微机型保护装置；
- (9) 干扰大型电机控制系统和电厂励磁系统；
- (10) 引起感应电机或同步电机的机械振动；
- (11) 引起基于电压过零检测或闭锁的触发电路的不稳定运行。

当然，这些不良影响的严重程度取决于谐波源及其所在位置和网络的谐波传播特性。

1.1.3 不平衡度产生的原因

正常运行的电力系统是三相对称的，表现为三相电源电动势对称、各相阻抗对称。当系统或发电机的对称运行状态遭到破坏时，就会出现电压或电流的不对称。应用对称分量法，可以将电流分解为正序电流 I_1 、负序电流 I_2

和零序电流 I_0 。因发电机绕组常接成星形，且中性点不接地或经阻抗接地，零序电流的影响可以忽略不计。

众所周知，单相非线性负荷不仅使波形畸变，而且能造成三相系统不平衡。对电网不平衡度的研究主要是对电网负序的研究。

根据电力系统的运行特点，负序电流的产生原因可以分为短时不对称运行和长时不对称运行两大类。

(1) 短时不对称运行，主要包括：

- 1) 电力系统不对称故障，包括不对称短路及一相断线；
- 2) 发电机不对称故障，包括单相、两相短路，分支短路，匝间短路；
- 3) 单相重合闸动作过程；
- 4) 出口断路器在正常及故障情况下，未能三相全部合上或断开的动作过程；

5) 主变压器高压侧断路器在正常及故障情况下，未能三相全部合上或断开的动作过程；

6) 出口断路器事故跳闸时，灭弧开关因故未能及时灭弧。

(2) 长时不对称运行，主要指长时间负荷不对称（如广泛使用的铁路电力机车、冶金单相电弧炉等大容量单相负荷）而形成的较大负序电流，对与这些负荷电气距离较近的发电机造成影响。

1.1.4 不平衡度对电力系统的影响

三相电力系统中产生负序电流的因素可以归纳为事故性和正常性两类。前者是由于三相电力系统中某一相或两相出现故障所致；而后者是由于三相元件不对称所致。对于事故性因素，一般可由继电保护和自动装置动作切除故障元件，在短期内使系统恢复正常，从而消除负序电流。目前在我国，电气化铁路产生的负序电流是电力系统中负序电流的主要部分。负序电流对电力系统的影响如下：

(1) 负序电流对同步发电机的主要影响是转子的附加损耗与发热，以及附加振动。单相电气化铁路牵引负荷会引起发电机的不对称运行。从发电机的安全运行角度考虑，规定各相电流均不应超过额定值，因此发电机的不对

称运行实际上限制了发电机的出力。

(2) 负序电压对异步电动机的影响很大。对于异步电动机来说,正序电压产生正序电流和顺转的电磁转矩;负序电压产生负序电流和逆转的电磁转矩。较小的负序电压加到异步电动机上将会引起较大的负序电流及负序逆转电磁转矩,可以引起电动机的额外发热,严重时烧毁电动机。

(3) 负序电流容易使电力系统中以负序分量为启动判据的继电保护装置误动作。

(4) 负序电流造成三相电流不对称,电力变压器三相电流中有一相电流最大,此最大电流不允许超过额定值,而其他两相均小于额定值运行,因此不能有效发挥变压器的额定出力,即变压器容量利用率下降。另外,负序电流还造成变压器的附加能量损失,在变压器铁芯磁路中产生附加发热。

(5) 负序电流通过送电线路时,负序功率实际上并不做功,它只造成电能损失,增加了网损,降低了送电线路的输送能力。

1.2 电力系统谐波和不平衡度的分布计算的必要性和意义

电力系统谐波分布计算就是要分析各种谐波源在供电系统中各个节点如何分布,通常称之为谐波潮流计算。谐波潮流计算是谐波分析和监测的基础,而对谐波的分析 and 监测则是电能质量研究中的一个重要内容。谐波计算是谐波测量前的准备工作和测量后的分析工具,是电网规划设计中谐波评估的一种重要手段。

1.2.1 谐波和不平衡度分布计算的必要性

电力牵引负荷谐波在电力系统中的分布计算是电力牵引负荷谐波研究中的重要问题。谐波分布计算是十分必要的,这是因为:

(1) 在电力系统设计阶段或是改造阶段电网并未完成,不可能进行现场实测,只能通过仿真来计算各种谐波源在系统中产生的谐波畸变情况,尤其是在电气化铁路的设计阶段,更是如此。

(2) 由于谐波分布计算可以方便地模拟出不同负荷条件以及系统不同运

行方式谐波源(如牵引变电站)在电网母线和支路上所引起的谐波畸变情况,这是现场无法完成的。

(3) 现场测量的是系统总的谐波畸变情况,包括谐波源引起的畸变,也包括电力系统自身产生的背景谐波和其他谐波源,难以具体分析具体谐波源对系统的影响。

1.2.2 谐波和不平衡度分布计算的意义

谐波分布计算用于研究电力系统规划和运行中与谐波有关的各种问题。谐波分布计算根据给定的电网结构和参数以及负荷、谐波源、滤波器等元件的运行条件,通过谐波潮流计算确定系统中谐波电流的分布以及各部分的电压和电流波形的畸变程度,或通过计算网络的频率来判断系统是否临近谐波谐振状态,以及怎样减小系统谐振发生的可能性。一方面,对于供电部门,通过谐波分布计算可以检验电力系统中的电压、电流波形畸变是否在允许的范围内,所投入的电力设备是否会引起电网谐振或谐波电流的放大,分析电气化铁路对整体电网的影响,从而尽可能避免谐波引起电力事故;另一方面,对于铁路部门,通过谐波潮流计算可以选择合适的滤波器,从而将电网的谐波污染控制在标准规定的范围之内。

电力系统三相基波与谐波模型

为了计算电气化铁路的谐波在电力系统中的分布,必须建立电力系统主要元件的基波和谐波模型,并在此基础上进行基波和谐波的潮流计算。本章主要讨论包含同步发电机、输电线、电力变压器、综合负荷等在内的电力系统电气元件的三相基波模型和谐波模型。

2.1 同步发电机的三相谐波模型

在研究牵引负荷谐波在电力系统的分布计算时,因为不考虑系统的背景谐波,故可以忽略发电机自身的谐波,认为其电动势是纯正弦的,即不含有高次谐波,因而发电机电势只存在于基波网络。在高次谐波网络中,发电机电动势(谐波电动势)为零,其等值电路为由发电机端点经谐波阻抗 X ,直接与中性点(地)相连。

为了获得网络的谐波导纳 Y_{gn} ,可以采用电阻与电抗串联的方法模拟发电机,即

$$Y_{gn} = \frac{1}{R\sqrt{n} + jX_d''n} \quad (2-1)$$

式中 R ——发电机的电阻,由发电机的功率损耗导出;

X_d'' ——发电机的次暂态电抗;

n ——谐波次数。

考虑到集肤效应,电抗上应该增加一些与频率有关的项。应该注意,由

于磁通不随转子旋转，正序电抗仍可视为同步阻抗，所以式（2-1）在基波频率条件下是无效的。

2.2 输电线路的三相基波与谐波模型^[30]

输电线路包括架空线和电缆。电缆由工厂按标准规格制造，可根据厂家提供的数据或者通过实测求得其参数，这里不予讨论。架空线路的参数与架设条件等外界因素有密切关系，下面介绍其参数（线路单位的基波参数和谐波参数）计算及对应模型的建立。

2.2.1 线路的基波参数

（1）电阻。有色金属导线单位长度的直流电阻可按式（2-2）计算，即

$$r_{01} = \rho / S \quad (2-2)$$

式中 r_{01} ——导线单位长度的直流电阻， Ω/km ；

ρ ——导线的电阻率， $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ ；

S ——导线载流部分的标称截面积， mm^2 。

考虑到集肤效应、邻近效应和多股绞线的扭绞等因素的影响，在使用式（2-2）时，不使用导线材料的标准电阻率，而改用略为增大的计算值，即铜为 $18.8\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ ，铝为 $31.5\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ 。在要求较高精度时， $t^\circ\text{C}$ 时的电阻值 r_t 可按式（2-3）计算，即

$$r_t = r_{01-20}[1 + \alpha(t - 20)] \quad (2-3)$$

式中 α ——电阻温度系数，对于铜 $\alpha = 0.003821/^\circ\text{C}$ ，对于铝 $\alpha = 0.00361/^\circ\text{C}$ 。

（2）电感。三相导线排列一般是对称的，故三相的电感是相同的。当三相导线排列不对称时，各相导线所交链的磁链及各相等值电感便不相同，这将引起三相参数不对称。因此，必须利用导线换位来使三相恢复对称^[31]。

当输电线采用单导线的形式时，经过计算可得到单相的平均电感为

$$L = \frac{\psi}{i} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{\text{eq}}}{D_s} \quad (2-4)$$

其中

$$D_{\text{eq}} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}$$

$$D_s = re^{-\frac{1}{4}}$$

式中 D_{eq} ——三相导线间的互几何均距，对于三相导线水平排列的线路，

$$D_{\text{eq}} = 1.26D;$$

L ——单导线平均电感，H/m；

D_s ——导线的自几何均距；

r ——导线的计算半径。

D_s 的经验取值如下：

对于非铁磁材料的单股线 $D_s = 0.779r$

对于非铁磁材料的多股线 $D_s = (0.724 \sim 0.771)r$

对于钢芯铝线 $D_s = (0.77 \sim 0.9)r$

当输电线采用分裂导线的形式时，其自几何均距 D_{sb} 与分裂间距及分裂根数有关，用 D_{sb} 替代式 (2-4) 中的 D_s ，便可得到分裂导线的等值电感

$$L = \frac{\psi}{i} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{\text{eq}}}{D_{\text{sb}}} \quad (2-5)$$

$$\text{分裂根数为 2 时} \quad D_{\text{sb}} = \sqrt[4]{(D_s d)^2} = \sqrt{D_s d} \quad (2-6)$$

$$\text{分裂根数为 3 时} \quad D_{\text{sb}} = \sqrt[9]{(D_s d d)^3} = \sqrt[3]{D_s d^2} \quad (2-7)$$

$$\text{分裂根数为 4 时} \quad D_{\text{sb}} = \sqrt[16]{(D_s d d \sqrt{2} d)^4} = 1.09 \sqrt[4]{D_s d^3} \quad (2-8)$$

式 (2-6) ~ 式 (2-8) 中 D_s ——每根多股绞线的自几何均距；

d ——各根导线的轴间距，也称分裂间距。

因此，额定频率下输电线路每相的等值电抗为 $x_{01} = 2\pi f_N L$ 。我国电力系统的额定频率为 50Hz (计及 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$)。

对于单导线线路

$$x_{01} = 0.0628 \ln \frac{D_{\text{eq}}}{D_s} = 0.1445 \lg \frac{D_{\text{eq}}}{D_s} \quad (\Omega/\text{km}) \quad (2-9)$$

对于分裂导线线路

$$x_{01} = 0.0628 \ln \frac{D_{eq}}{D_{sb}} = 0.1445 \lg \frac{D_{eq}}{D_{sb}} \quad (\Omega/\text{km}) \quad (2-10)$$

(3) 电容。输电线路的电容是用来反映导线带电时在其周围介质中建立的电场效应的。输电线路每相的等值电容可按下列公式计算。

$$\text{单导线线路} \quad C = \frac{0.0241}{\lg \frac{D_{eq}}{r}} \times 10^{-6} \quad (\text{F/km}) \quad (2-11)$$

$$\text{具有分裂导线的输电线路} \quad C = \frac{0.0241}{\lg \frac{D_{eq}}{r_{eq}}} \times 10^{-6} \quad (\text{F/km}) \quad (2-12)$$

式中 D_{eq} ——各相分裂导线重心间的几何均距；

r_{eq} ——一相导线组的等值半径。

$$r_{eq} \text{ 的取值与分裂根数有关, 对于二分裂导线 } r_{eq} = \sqrt{rd} \quad (2-13)$$

$$\text{三分裂导线} \quad r_{eq} = \sqrt[3]{(rd^2)^3} = \sqrt[3]{rd^2} \quad (2-14)$$

$$\text{四分裂导线} \quad r_{eq} = \sqrt[4]{(r\sqrt{2}d^3)^4} = 1.09\sqrt[4]{rd^3} \quad (2-15)$$

对于单导线线路, $r_{eq} = r$, 即等于导线的半径。

因此, 在额定频率下, 线路单位长度的一相等值电纳为

$$b_{01} = 2\pi f_N C = \frac{7.58}{\lg \frac{D_{eq}}{r_{eq}}} \times 10^{-6} \quad (\text{S/km}) \quad (2-16)$$

2.2.2 线路的谐波参数

由于线路的电感、电容可认为是与频率无关的常量, 因而其谐波电抗和电纳等于其基波电纳值乘以谐波次数 n 。由于集肤效应, 线路有效电阻将随谐波次数的增加而增加, 当电阻以欧/千米 (Ω/km) 的有名值表示时, 线路的 n ($n \neq 1$) 次谐波单位长度电阻值 r_{on} 可由下列近似公式求得

$$r_{on} = 0.288r_{01} + 0.138 \sqrt{nr_{01}} \quad (2-17)$$

式中 r_{01} ——线路单位长度基波电阻值, Ω/km 。

因而线路单位长度的谐波参数为

$$y_{0n} = jnb_{01} \text{ (S/km)} \quad (2-18)$$

$$z_{0n} = r_{0n} + jnx_{01} \text{ (}\Omega/\text{km)} \quad (2-19)$$

显然，式中的基波参数应根据前述对具体参数的计算选用相应的值。

2.2.3 线路的基波与谐波模型

输电线路是分布参数电路，经过完全换位的线路可以看作是三相对称的。潮流计算中通常以集中参数的等值 Π 形电路表示，如图 2-1 所示。

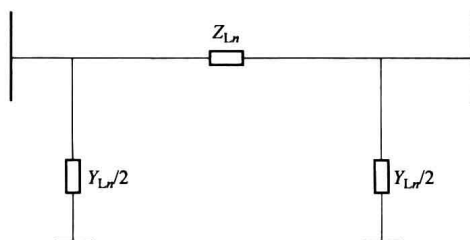


图 2-1 输电线路的谐波等值 Π 形电路

进行基波计算时，等值电路参数通常为分布参数的简单集中，即

$$Z_{L1} = (r_{01} + jx_{01})L \quad (2-20)$$

$$Y_{L1} = jb_{01}L \quad (2-21)$$

式中 r_{01} 、 x_{01} 、 b_{01} 、 L ——线路单位长度的基波阻抗、电抗、导纳（电导一般均忽略）和线路长度。

这种简单集中的做法只适用于距离较短的线路（架空线路小于 300km，电缆线路小于 100km）。当距离较长时，式 (2-20) 和式 (2-21) 需加以修正，或增加等值 Π 串接的数目，即每个等值 Π 所代表的线路距离不得过长。

谐波计算中，原则上仍可采用这种等值电路。但谐波时线路的分布特性比基波时更显著，因而每个等值 Π 所能代表的线路距离将大为缩短。对架空线路，若每个等值 Π 能代表的线路最大长度在基波时为 300km，则对 n 次谐波将限制为 $300/n$ km。因此谐波计算所需的等值 Π 数目将大为增加，而且各次谐波所需的数目也不相同。此时，采用双曲线函数计算等值电路参数将更为便利，每条线路只需采用图 2-1 所示的一个等值 Π 形电路即可，其参数为